

伝導冷却型RE系高温超電導マグネットの構成法に関する研究

岩井, 貞憲

<https://doi.org/10.15017/1931939>

出版情報 : 九州大学, 2017, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 岩井 貞憲

論 文 名 : 伝導冷却型 RE 系高温超電導マグネットの構成法に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

RE 系高温超電導線材 (RE:Rare Earth、以後 RE 系線材) は、高磁界中でも高機械強度と高臨界電流密度特性を有することから、MRI や超電導電力貯蔵装置用の超電導マグネットの更なる高磁界化と小型・軽量化が期待できる。また、従来よりも高温まで幅広い温度領域で運転できるため、液体ヘリウムを必要としない伝導冷却方式を採用でき、冷却構造の大幅な簡素化が可能となる。しかしながら、伝熱経路の確保を目的としてコイルを樹脂で含浸すると、通電特性が著しく低下する「コイル化に際する特性劣化」が問題となっていた。

この特性劣化の問題により、マグネットとしての設計・製造、すなわち工業化が難しく、応用研究が進展しないという悪循環に陥っていた。また、劣化防止策を講じたコイルであっても、ひとたび線材が部分的に常電導転移してしまうと、熱暴走を引き起こしコイルが焼損してしまう危険性もあった。本研究は、RE 系線材のコイル化に際する特性劣化の機構を解明するとともにその防止策について検討し、また、RE 系線材の通電特性に基づき、コイル内での微少な発熱特性を定量的に推定する手法を考案するとともに、伝導冷却により効率的に排熱する巻線構成法を提示したものである。さらに、これを設計に採用した高磁界、大口径マグネットの特性を評価し、高磁界中でも高電流密度にして安定に通電可能な伝導冷却型 RE 系高温超電導マグネットの設計・製作法の妥当性を検証している。本論文は、これらの研究をまとめたもので、下記のように 6 章より構成されている。

第 1 章では、まず本論文の背景として RE 系線材、および伝導冷却方式を超電導マグネットに適用することによる利点について述べている。また、特性劣化がマグネットの性能にどのような影響を与えるかを説明し、特性劣化の機構解明とその劣化防止策の明確化の重要性について解説している。さらに、コイルを熱暴走させることなく安定に通電するためには、コイル内の微少な発熱特性が定量的に予測できること (発熱特性予測)、劣化防止対策を講じたコイルでもコイル内部まで冷却できること (伝熱経路確保) が必要であることが述べられている。

第 2 章では、特性劣化の原因究明を第一目的として、コイル製作プロセスにおいて RE 系線材の超電導特性を劣化させる原因となり得る要因について調査している。その結果、RE 系線材と含浸樹脂との熱収縮差に起因する冷却時の熱応力や電磁力でコイル径方向の熱応力 σ_r が特性劣化の主要因であることを示した。また、 σ_r がコイルの内径と外径との比 (内外径比) に依存することを見出し、内外径比から許容剥離応力を定量的に評価する手法、またコイルの巻線部を径方向に機械的に分割することで、発生する σ_r を許容剥離応力以下に低減する劣化防止手法を提示した。さらに本手法により分割の有無が異なる同諸元の小コイル試作し、劣化防止手法の有効性を実証した。

第 3 章では、コイル内の発熱特性を予測する手法について述べている。主要な発熱源となる磁束フロー抵抗による発熱を予測するためには、通電時の電流-電圧特性の定量的な計算手法が必要となる。RE 系線材はテープ形状のアスペクト比の大きな形状をしているため、線材幅方向の経験磁場の違いで線材幅方向に電流分布が生じ、電流-電圧特性を精度良く予測することが難しいという課題があった。そこで本章では、通電特性の定量的な予測計算手法の構築を目的として、試作コイルの通電特性を評価するとともに、通電によるコイル内発熱の定量的評価手法を提示し、その妥当性を検証した。

第 4 章では、コイル内の伝熱経路の設定手法について述べている。コイルの発熱が適切な伝熱経路によって冷凍機まで伝熱輸送され効率的に排熱されなければコイルは熱暴走してしまう。巻線部を径方向に機械的に分割すると、径方向の伝熱性能が低下して温度差が生じ、そのため局所的に RE 系線材の運転限界温度を超えた箇所熱暴走してしまう恐れがあった。そこで、発熱特性を予測した上で、劣化防止策としてコイルの巻線部を径方向に分割したコイルであっても、コイル内部まで

冷却可能な伝熱構造について設計・検討を行った。径方向の分割数をパラメータとしてコイルで生じる伝熱温度差の計算手法を提示し、伝熱温度差を低減するコイル内伝熱構造の検討した結果、RE系線材のテープ幅方向端部、すなわちコイル軸方向端面の全面に高純度アルミ製の均熱板を配置することにより効率的な冷却が可能であり、コイル内温度差を低減し、コイルを安定に運転できることを示した。

第5章では、前章までの研究成果の実機における有効性を検証するために、内径50mmの小口径10T級伝導冷却型高磁界コイルと、伝熱による温度差が生じやすい室温ボアφ400mmの1.5Tコイルを設計・試作し特性を評価している。前者については中心磁場13.5T、後者では中心磁場1.5Tを伝導冷却下で熱暴走することなく安定に発生しうることを確認し、本論文で提示した伝導冷却型RE系マグネットの構成法の妥当性を検証した。

第6章では、本論文で得られた成果を総括するとともに、今後の課題についても述べている。